

# ブレイン・マシン・インターフェースの 進化と社会実装に向けた課題

主任研究員 秦野貫

TEL : 050-5471-1041

脳と機械を直接接続して相互作用させるブレイン・マシン・インターフェース（BMI）が本格的に社会実装される日が近づいている。米国で麻痺障害がある患者の運動能力を補う技術の臨床試験が相次ぎ、いずれ日本でも導入される可能性がある。将来は治療以外の日常的な用途も広がるとみられ、円滑な社会実装を進めるためには倫理的・法的・社会的課題（ELSI）に早くから対処しておく必要がある。BMIをどう活用し、規制していくべきなのか、国内でも企業や市民が広く参加する形で議論を深めていくべきだ。

## 1. ブレイン・マシン・インターフェース（BMI）とは

「ブレイン・マシン・インターフェース（BMI）」は脳（ブレイン）と機械（マシン）を接続して直接データをやり取りし、脳神経の機能を補助・補完する技術を指す<sup>1</sup>。日本語で「脳介機装置」と訳されることもある。主にコンピューターとの接続が想定されており、海外では「ブレイン・コンピューター・インターフェース（BCI）」と呼ばれることが多い。BMIの厳密な定義は定まっておらず、脳の活動データを測定・解析して活用する技術を広く包含して説明されることもあるが<sup>2</sup>、本稿では「脳データを用いた機器制御・行動支援」をBMIとして述べる。

BMIは機能や体内への導入方式によって次のように分類することができる。機能としては、機械から脳に情報を書き込む「入力型」、機械が脳の情報処理に介入する「介入型」、脳から機械に情報を書き出す「出力型」がある。導入方式としては、手術によって脳の表面や脳内にセンサーを設置する「侵襲型」と、体外のセンサーで脳活動データにアクセスする「非侵襲型」に分けられる。侵襲型は取得できるデータの質が高い利点がある一方、デバイスを留置することによる組織の損傷や免疫反応、感染症リスク等の課題がある。

BMI研究の源流は1960年に公表された「サイボーグ」に関する論文に遡るとされる<sup>3</sup>。以降のBMI研究の歴史は60年余りあり、既に一部の脳機能を補うものとして実用化されているものもある。入力型では体外のマイクが拾った音声を耳の奥に設置した電極を通じて脳に届ける人工内耳や、カメラでとらえた光の情報を電気信号として脳に送る人口網膜が代表的だ。介入型では、脳に電極を埋め込んで特定部位に刺激を与える深部脳刺激（DBS）がパーキンソン病による運動機能障害の治療に利用されている。出力型は脳活動の測定手段としての皮質脳波（ECoG）等があるほか、脳活動データに基づいてロボットが患者の動きをサポートするリハビリ支援機器や、消費者向けに精神状態を把握する製品等が販売されている。

<sup>1</sup> 吉峰俊樹・平田雅之・柳沢琢史・貴島晴彦（2016）「ブレイン・マシン・インターフェース（BMI）が切り開く新しいニューロテクノロジー」（日本脳神経外科コンgres『脳神経外科ジャーナル』25巻12号）

<sup>2</sup> 計測した脳活動データを被験者自身が行動改善に活かす「ニューロフィードバック」等は広義のBMIと位置付けられる。（三原雅史（2018）「治療型BMIとしてのNeurofeedbackの神経疾患治療への応用」（『臨床神経生理学』46巻1号））

<sup>3</sup> Manfred E. Clynes & Nathan S. Kline(1960)“Cyborgs and Space”をきっかけに人と機械が融合する技術の研究が盛んになったと考えられる。（横井浩史、姜銀来（2017）「BMI出力デバイス—人と機械が相互に適応できる技術を目指して—」（精密工学会『精密工学会誌』Vol.83 No.11））

《図表 1》主な実用化済みの BMI

		機 能		
		出 力 (脳から機械に情報を送る)	入 力 (機械から脳に情報を送る)	介 入 (脳の情報処理に機械が介入)
導 入 方 式	侵 襲 (手術が必要)	・皮質脳波 (ECoG) ※	・人工内耳 ・人工網膜	・深部脳刺激 (DBS)
	非侵襲 (手術が不要)	・頭皮脳波 (EEG) ※ ・磁気共鳴機能画像法 (fMRI) ※	・経頭蓋磁気刺激法 (TMS) ・超音波刺激法	

(注) ※は脳活動の測定手段であり機械と組み合わせることで脳機能の補助・補充が可能になる。

(出典) 紺野大地・柳澤琢史 (2022) 「医療応用の実現に向け産学で加速する BCI 研究」(週刊医学界新聞通常号 第 3451 号) 等を基に SOMPO インスティテュート・プラス作成

## 2. BMI 実用化の動きが本格化

### (1) 国家レベルで基礎研究に投資

世界の BMI 市場は 2022 年の 18 億 6,000 万ドル (約 2,700 億円) から 2032 年に 83 億 7,000 万ドルに拡大すると予測され、同期間の CAGR (年平均成長率) は 16% と急成長が見込まれる<sup>4</sup>。高齢化でパーキンソン病等の神経変性疾患が増え、医療用途の需要が高まるためだ。市場拡大を見込んだ投資も活発化し、BMI を含む脳神経技術を手掛ける企業への投資額は 2021 年に世界で 71 億ドルと 5 年前の 2 倍超に増えた<sup>5</sup>。

加えて国家が主導する基礎研究への投資が技術革新を加速させる。米国は 2013 年に「The BRAIN Initiative」を発表し、国立衛生研究所 (NIH) や国防高等研究計画局 (DARPA)、食品医薬品局 (FDA) といった国家機関を中心に脳機能の解明や治療方法等の研究を進めている。民間からも財団や研究機関、大学、企業が参加し、2026 年までに少なくとも 48 億ドルの資金が投じられる見通し<sup>6</sup>。

欧州連合 (EU) は 2013 年から 2023 年にかけて 6 億 700 万ユーロを投じて「Human Brain Project」を実施した。500 人を超す研究者や 155 の機関が参加し<sup>7</sup>、成果の一部は 2019 年にスタートした脳研究データベース「EBRAINS」に引き継がれた。BMI については EU の研究費助成プログラムでも別個に資金が拠出された<sup>8</sup>。中国は「China Brain Project」を 2021 年に本格的に開始し、最初の 5 年間に 50 億元を投じる見通し<sup>9</sup>。中国は第 14 次五カ年計画 (2021~2025 年) でも BMI 等脳科学に注力することを明記している。

日本では 2007 年に策定した長期的な研究開発指針「イノベーション 25」で脳機能や疾患に関する研究目標を盛り込み、2008 年に BMI の開発や脳神経疾患の克服を目指す「脳科学研究戦略推進プログラム (脳プロ)」が始動した。2014 年には脳機能解明を目指す「革新的技術による脳機能ネットワークの全容解明プロジェクト (Brain/MINDS、革新脳)」がスタートし、400 億円規模の予算計画で小型サルを使った研究を進めて来た。海外と連携する「戦略的国際脳科学研究推進プログラム (Brain/MINDS Beyond、国際脳)」も 2018 年に始まった。革新脳が終了する 2024 年度からは 6 年間の新たなプロジェクトを創設し、仮想空間上に脳を再現する「デジタル脳」の構築を進める<sup>10</sup>。BMI に関しては 2020 年に始まった科学技術の破壊的イノベーション創出を目指す「ムーンショット型研究開発事業」の中でプロジェクトが進んでいる<sup>11</sup>。

<sup>4</sup> The Brainy Insights (2023) “Brain Computer Interfaces Market”

<sup>5</sup> NeuroTech Analytics(2021)“NeuroTech Industry Overview Q4-2021”

<sup>6</sup> National Institutes of Health( 2023 年 1 月 12 日)“Congress passes budget bill: NIH BRAIN Initiative receives \$60M in additional funds for fiscal year 2023”

<sup>7</sup> Human Brain Project (2023) “Pioneering Digital Neuroscience”

<sup>8</sup> 「第 7 次枠組計画」(2007~2013 年) や「Horizon 2020」(2014~2020 年) で予算が設定された。

<sup>9</sup> 科学技術振興機構 (2023) 「研究開発の俯瞰報告書 (2023 年)」

<sup>10</sup> 文部科学省 (2023) 「令和 6 年度予算 (案)」

<sup>11</sup> ムーンショット目標 1 の研究開発プロジェクト「身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放」

≪図表2≫世界の主な脳研究プロジェクト

国・地域	米 国	欧州連合(EU)	日 本	韓 国	中 国
プロジェクト	The BRAIN Initiative	Human Brain Project	Brain/MINDS	Korea Brain Initiative	The China Brain Project
期 間	2013年～	2013年～2023年	2014年～2024年	2016年～	2021年～
予算規模	48億ドル	6億ユーロ	400億円	不明	50億元
概 要	神経変性疾患や、情報処理をつかさどる脳神経の仕組みを解明する。財団や著名研究機関、大学、企業が参加	神経科学等複数の学問分野とコンピューティングを融合。500人超の研究者、155の機関が参加し、脳の3D構造モデル等を開発	ヒト脳のモデル動物としてマウスの神経回路を解明し、疾患の治療法開発に貢献する。理化学研究所、東京大学等が参加	脳機能の仕組みを科学的に理解するための基礎研究を育成しつつ、神経変性疾患の新たな治療法を開発する	認知機能のメカニズムを分析し、脳の発達の仕組みの解明や疾患の治療、BMI等コンピューティングとの融合につなげる

(出典) 各国・地域の公表資料、科学技術振興機構(2023)「研究開発の俯瞰報告書(2023年)」等を基に SOMPO インスティテュート・プラス作成

## (2) 侵襲×出力型で臨床試験が相次ぐ

足元では医療用途で BMI の実用化を目指す動きが活発になっている。具体的には脳の表面や内部に設置した電極から脳活動データを取得し、患者が考えた通りに機械を動かす侵襲×出力型の BMI で、筋萎縮性側索硬化症(ALS)等麻痺障害を持つ患者への適用を目指すものだ。侵襲×出力型 BMI の臨床研究は2004年に米ブラウン大学のグループによって本格的に始まったが<sup>12</sup>、実用化には至っていなかった。2010年代後半からは電子部品や電極の素材、解析技術といったハード・ソフトの進化が追い風となり、キーボード等を用いることなく機器を操作する技術の臨床研究が相次いでいる。2023年には脊髄を電気刺激する装置を組み合わせ患者自身の足による歩行機能の回復に成功した事例も報告された<sup>13</sup>。

市場の創出を目指す企業の参入も広がり、特に米国では複数の臨床試験が始まっている。米 Synchron は2021年に BMI の臨床試験として初めて FDA の認可を受け、ALS 患者を対象とした試験を開始した<sup>14</sup>。カテーテル手術によってステント型の電極を脳内に置く低侵襲型で、データ送信機を通じてパソコンやスマートフォンに患者の意志を反映する。テキスト入力やオンラインショッピング等を利用でき、2021年12月には BMI による初の Twitter(現 X)投稿を実現した<sup>15</sup>。起業家のイーロン・マスク氏が設立した米 Neuralink も2024年に事故による麻痺患者を対象とした臨床試験を開始した<sup>16</sup>。同社の BMI はロボットによる手術を実施し、約1000個の電極を持つ糸状センサーとデータの送受信装置で構成するデバイスを脳皮質上に設置する。データは無線通信で体外に送られ、パソコン等を操作する。両社の臨床試験が順調に進めば、数年後には FDA の医療機器承認を取得し、治療に使われるようになる可能性がある。

一方、データの質は劣るものの身体の負担は軽い非侵襲型の BMI も、その特徴を生かした研究開発が進んでいる。慶應義塾大学発スタートアップの LIFESCAPES は麻痺患者向けのリハビリ用訓練装置を2023年に発売した。ヘッドセットで脳波を読み取ると同時に麻痺した手指に装着した電動装具を動かして残された

<sup>12</sup> ブラウン大の研究チームは脊髄損傷による四肢麻痺患者の脳内に神経電極を埋め込み、患者の思考によるコンピューターのカーソル操作に成功した。(L. R. Hochberg et al., (2006) “Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia”, Nature 442)

<sup>13</sup> Henri Lorach et al., (2023) “Walking naturally after spinal cord injury using a brain–spine interface”, Nature 618

<sup>14</sup> Synchron(2021年7月28日) “Synchron receives green light from FDA to begin breakthrough trial of implantable brain computer interface in US”

<sup>15</sup> Synchron(2021年12月23日) “Synchron announces first direct-thought tweet, “Hello World,” using an implantable brain computer interface”

<sup>16</sup> Elon Musk(2024年1月30日) “The first human received an implant from Neuralink yesterday and is recovering well.”, <https://x.com/elonmusk/status/1752098683024220632>、Neuralink(2024年3月21日) “Neuralink live”, <https://x.com/neuralink/status/1770563939413496146>(いずれも2024年3月22日参照)

神経回路の活性化を促す仕組みで、将来は医療機器承認を目指すという<sup>17</sup>。脳の指令によって運動時に発生する「筋電位」を検知して義手を動かす「筋電義手」は開発企業が相次いでおり、例えば米 BrainRobotics は人工知能（AI）と組み合わせで精密に制御する製品を 2024 年に発売する予定だ<sup>18</sup>。

出力型 BMI は今後 AI との組み合わせによって進化が加速すると考えられる。活用方法の 1 つとして期待が大きいのが取得した脳データを解析・予測する「デコーディング」の性能向上だ。患者の意志と脳活動の関係をディープラーニング（深層学習）によって AI に学ばせ、脳データを解析する際の誤りを減らすことを狙う。京都大学の神谷之康教授による非侵襲的手法の研究が知られるほか、2023 年には侵襲型で大幅な誤り率の低下や解読速度向上に成功した例が相次ぎ報告された<sup>19</sup>。

《図表 3》米 Neuralink の BMI デバイス



（出典）Neuralink 社資料に加筆

### （3）多様な場面に応用の可能性

BMI は将来、医療用途に限らず日常生活の多様な場面で活用される可能性がある。例えば家電やスマートフォン、ゲーム、インターネット上の仮想空間「メタバース」におけるアバター等、デジタル機器・ソフトを操作する際にコントローラーや動作が不要となったり、「テレパシー」のように感覚・運動器官を介さずにコミュニケーションを取ったりといった使い方が想定される。実際、コンピューター等を一部操作できる非侵襲型のヘッドセットについては、フランスの Nextmind 社が 2020 年に発売した例があるほか、米 Cognixion は麻痺患者向けの医療機器として開発を進めている<sup>20</sup>。米 OpenBCI が 2024 年に発売を予定するデバイスは脳に加えて心臓、皮膚、筋肉、目の動きを同時に測定し、ゲームやドローンの操作が可能だという<sup>21</sup>。米 Meta は筋電位を読み取って空間コンピューティングを操作するリストバンド型のデバイスを開発中で、数年内の発売を目指している<sup>22</sup>。米 Apple もイヤホン型の脳波計測装置の特許を出願したことが 2023 年に明らかになった<sup>23</sup>。こういった技術が進化・普及すれば、手足や目の動きといった身体による操作の煩わしさから解放され、例えばメタバースの使い勝手や没入感は各段に向上すると予想される。

今後は出力と入力の双方の機能を備えた BMI の開発が進む見通しだ。マスク氏は「Neuralink の最終目標は脳と AI を融合し、人間が AI に置き去りにされるリスクを軽減することだ」と述べており<sup>24</sup>、Neuralink のデバイスは脳への入力も想定して開発されている。国内でも AI やインターネットと脳を接続して脳の機能を飛躍的に高める研究が始まっている<sup>25</sup>。将来データの入出力が可能な汎用的デジタルインターフェース

<sup>17</sup> 日本経済新聞電子版(2023年6月28日)「脳波分析し手を操作、脳卒中リハビリ装置 慶大発新興が実用化」、<https://www.nikkei.com/article/DGKKZO72282440Y3A620C2EA2000/> (2024年3月18日参照)

<sup>18</sup> Brainrobotics ホームページ <https://brainrobotics.com/> (2024年3月18日参照)

<sup>19</sup> Francis R Willett et al., (2023) “A high-performance speech neuroprosthesis”, Nature 620 等

<sup>20</sup> Cognixion(2023年5月4日)“Cognixion Receives FDA Breakthrough Device Designation”

<sup>21</sup> OpenBCI(2023年12月1日)“OpenBCI unveils Galea Beta and Galea Unlimited Roadmap”

<sup>22</sup> UploadVR(2024年2月20日)“Zuckerberg: Neural Wristband For AR/VR Input Will Ship "In The Next Few Years"”, <https://www.uploadvr.com/zuckerberg-neural-wristband-will-ship-in-the-next-few-years/> (2024年3月18日参照)

<sup>23</sup> Apple Inc. (2023) “Biosignal Sensing Device Using Dynamic Selection of Electrodes”, United States Patent and Trademark Office, Pub. No. : US 2023/0225659 A1

<sup>24</sup> Neuralink(2022年12月1日)“Neuralink Show and Tell, Fall 2022”, <https://www.youtube.com/live/YreDYmXTYi4>

<sup>25</sup> 科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業プログラム ERATO の一環で「池谷脳 AI 融合プロジェクト」が 2018 年から脳と AI を連動させる研究を進めている。

として BMI が広く利用されるようになると、パソコンやスマートフォン、テレビといった既存のインターフェースはもちろん、今後普及が見込まれるヘッドセット等の XR (クロスリアリティ) 用デバイスも不要になるため、電子機器産業への影響も大きくなるだろう。

軍事利用の可能性も現実味を増している。米 DARPA は 2000 年代初めから BMI 研究に数億ドルを投じているとみられ<sup>26</sup>、2018 年には脳と機械の間で双方向にデータをやり取りする非侵襲型 BMI を開発する「N3 プログラム」を開始した。ドローン操作やサイバー防衛での利用を想定し、軍事作戦における応用を視野に入れている<sup>27</sup>。米国では陸軍や空軍も 2000 年代から BMI の研究を進めている<sup>28</sup>。中国人民解放軍は認知領域を物理・情報に並ぶ三大作戦領域のひとつと捉え、敵の脳を支配する「制脳」を将来の戦争で想定している<sup>29</sup>。日本でも防衛省が 2023 年、防衛技術基盤の方針を示す「防衛技術指針」で初めて BMI に言及した。将来は戦場を飛ぶドローンから脳に情報を取り込んで作戦を実行したり、戦闘機や戦闘ロボットを脳波で操ったりといった兵士が登場することも考えられる。

### 3. BMI を巡る倫理的・法的・社会的課題 (ELSI)

#### (1) 想定される ELSI の整理

BMI は現在急速に発展している最中で、センサー性能やデータ解析精度の向上、身体への悪影響の回避等技術的に乗り越えるべきハードルは多く残っている。ただ仮に技術的課題が解決されたとしても、人を人たらしめている器官である脳に変化を加えることには多くの人が多様な意見を持つはずだ。したがって BMI を多くの人に受け入れられ、有効に活用される方向で発展させていくには、技術面の進化と並行して倫理的・法的・社会的問題 (Ethical, Legal and Social Issues, ELSI) にも真剣に対応していくことが重要になる<sup>30</sup>。

それでは今後 BMI を巡って具体的にどういった ELSI が顕在化していくことになるのだろうか。BMI に関する ELSI の議論は多岐にわたる一方で整理や提言が遅れている面があり<sup>31</sup>、本稿では社会実装に向けた課題を明確にするという観点から、改めて技術の発展・普及過程に沿う形で整理した。なお技術的課題は解決されることを前提とし、ELSI は技術の発展・普及に伴って追加的に発生していくものとする。

#### ① 研究

医療・医学研究で広く尊重されている基本的な原則である「生命倫理の 4 原則」<sup>32</sup>は、BMI においても研究者や企業が守るべき普遍的な概念であろう。このうち人間を被験者とする段階では患者自身の意志や決定を重視する「自律性の尊重」と、患者に危害を及ぼさない「無危害」の 2 つが特に重要であると考えられ<sup>33</sup>、

<sup>26</sup> RAND Corporation (2020) “Brain-Computer Interfaces U.S. Military Applications and Implications, An Initial Assessment”

<sup>27</sup> Defense Advanced Research Projects Agency (2018 年 3 月 16 日) “Nonsurgical Neural Interfaces Could Significantly Expand Use of Neurotechnology”

<sup>28</sup> 前掲注 26

<sup>29</sup> 飯田将史 (2021) 「中国が目指す認知領域における戦いの姿」(防衛研究所『NIDS コメンタリー』第 177 号)

<sup>30</sup> 新興技術の社会的受容を円滑に進めるためには普及前の早い段階から市民の視点を取り入れ、問題解決や研究開発の修正に活かす「アップストリーム・エンゲージメント」が有効であると指摘されている (James Wilsdon & Rebecca Willis (2004) “See-through Science: Why Public Engagement Needs to Move Upstream”)

<sup>31</sup> 三羽恵梨子・中澤栄輔・山本圭一郎・瀧本禎之・赤林朗 (2018) 「出力型 Brain-Computer Interface に関する倫理的論点とその考察—体系的な文献レビューに基づいて—」(日本生命倫理学会『生命倫理』Vol.28 No.1)

<sup>32</sup> 「自律性の尊重」、「無危害」のほか、患者のために最善を尽くす「善行」、患者を平等・公平に扱う「公正」の 4 つから成る。(Tom L. Beauchamp & James F. Childress (1997) “Principles of biomedical ethics”、トム・L. ビーチャム、永安幸正・立木教夫訳 (1997) 『生命医学倫理』成文堂)

<sup>33</sup> 植原亮 (2012) 「社会脳と機械を結びつける」(芋阪直行編 (2012) 『道徳の神経科学 神経倫理からみた社会意識の形成』新曜社)

これを実現するには被験者と研究者の間で十分なインフォームドコンセントを確保することが求められる。被験者の遺伝的素因など研究課程で偶然知り得た情報の扱いも問題点として挙げられる。

## ② 患者の治療

疾病・障害への臨床応用が進むと、日常的に取得される脳データの取り扱いに関する問題が発生する。脳データは個人情報なのか、プライバシー保護の対象なのかといった問題は、技術開発に活用することのメリットも踏まえつつ法的視点から整理する必要がある。さらに BMI は思考を解読したり脳に変化を及ぼしたりするため、基本的人権として保障される「内心の自由」の新たな概念として「認知の自由」を保護すべきだとの議論も起きている<sup>34</sup>。人格等、想定した治療の目的とは異なる部分に予期せぬ変化を及ぼす可能性もあり、そもそも「他人の脳にどこまで介入してよいのか」という問題は、哲学的観点からも深く議論されるべきだろう。

## ③ 健常者の能力拡張

BMI を健常者にも適用する際には、まず「人間拡張（エンハンスメント）はどこまで認容されるべきなのか」という大きな問題と向き合う必要がある。健常者への BMI 適用は人間が持つ能力の限界を超えることを意味し、学習やスポーツにおける「ニューロドーピング」が実現し得る。他人の心を読み取る「マインドリーディング」や心を操作する「マインドコントロール」も可能になるかもしれない。こういった技術は子どもや被雇用者など従属的な立場の人に対して本人の同意がないまま導入されたり、本人が意図しない用途で利用されたりする恐れがある。また、軍事利用が進めば戦争の形態は一変し、国家間のパワーバランスにまでも影響する可能性がある<sup>35</sup>。

## ④ 自主的な利用

一般消費者が広く自主的に BMI を利用するようになると、ELSI の範囲はさらに広がる。1つは BMI の利用を巡る機会の不均等や差別の問題だ。金銭的理由等によって BMI を利用したくてもできない人がいた場合、個人の努力や訓練と関係ない要因で経済的・社会的な不平等が発生しかねない。同様に個人的信条や健康面の理由等で BMI を利用しない選択をした人と BMI 利用者の中に「BMI デバイド」とも言うべき格差が生じる懸念がある。脳とインターネットを接続することも想定され、ハッキングによる情報の盗難や行動監視、行動操作といった事象も起こり得る。利用者が増えれば誤作動等による事故の影響も大きく、効果や品質を巡る責任や保証について、国や企業には技術・サービスの透明性確保が求められるだろう。

《図表 4》BMI の発展・普及過程と ELSI

研究	生命倫理の四原則（自律性、無危害、善行、公正）尊重	十分なインフォームドコンセント
	脳データの扱い方	「認知の自由」に対する介入の是非
治療	人格や心の変化はどこまで許されるか	
	能力拡張	子どもや被雇用者等に対する強要
本人が意図しない用途での利用		学習やスポーツにおける「ニューロドーピング」
マインドリーディング・マインドコントロール		軍事利用、戦争のあり方の変化
自主的な利用		BMI へのアクセスを巡る差別・不平等
	誤作動による事故が発生した場合の対処や責任の所在	脳のハッキングや行動監視
	技術・サービスの透明性	自家製 BMI の是非と危険性
		消費者向け製品の効果担保

（出典）植原亮（2012）「社会脳と機械を結びつける」、三羽恵梨子ら（2018）「出力型 Brain-Computer Interface に関する倫理的論点とその考察—体系的な文献レビューに基づいて—」等を基に SOMPO インスティテュート・プラス作成

<sup>34</sup> 山口直也（2022）「神経法学の序論的考察」（立命館大学法学会『立命館法学』403号）

<sup>35</sup> 前掲注 33

## (2) ELSI を巡る議論の状況

上記のような世界が実現するとは現在の感覚ではにわかに想像しがたいが、夢物語とばかりも言えない現実が既に起きている。中国では鉄道運転士や小学生の集中度や疲労度をモニタリングしている例がある<sup>36</sup>ほか、欧米でも疲労の把握等を目的に従業員の脳波を継続的に計測する企業が広がっている<sup>37</sup>。BMI が社会にもたらす恩恵は大きいと考えられ、技術革新が起きれば BMI の社会実装と ELSI の顕在化は急速に進む可能性がある。

BMI の社会実装が近づく欧米では ELSI の議論も活発化している。米国の BRAIN Initiative や EU の Human Brain Project は同時に ELSI に関するプログラムも実施している<sup>38</sup>。国レベルでは米 FDA が 2021 年に埋め込み型 BMI の研究に関するガイドラインを策定し<sup>39</sup>、中国も 2023 年に「倫理指針」を決定した<sup>40</sup>。チリ等では法制化を試みる動きも出ている<sup>41</sup>。民間でも欧米の複数大学に研究教育組織が設置され、研究者ネットワークの組織化も進む。企業や学会等による公開型のイベントも多く開催されている。

国際的な合意形成については、人権保護の観点で国連教育科学文化機関 (UNESCO) や欧州評議会、国連人権理事会等が議論しているほか、技術・倫理面の標準化で米国電気電子学会 (IEEE) が 2015 年に専門組織を設けて活動している。社会実装に向けた企業の役割と責任については経済協力開発機構 (OECD) が 2019 年に勧告を採択した<sup>42</sup>。

日本でも 2008 年の脳プロで倫理問題の研究が設定され、比較的早い時期から議論が始まった。民間では 2009 年に川人光男氏らが「BMI 倫理 4 原則」を公表し、慶應義塾大学の牛場潤一准教授 (現教授) は海外の研究者と共同で 2017 年に「BMI 倫理綱領 3 基準」を発表した<sup>43</sup>。日本医療研究開発機構 (AMED) による「脳科学研究の倫理的・法的・社会的課題の解決に関する研究」は 2021 年に「BMI 研究のための倫理ガイド」を作成し、これを一部引き継ぐ「人と社会と脳科学のための知的ネットワーク」は研究者と市民の対話の場を設けている。ムーンショット型研究開発事業では「BMI 利用ガイドライン」の作成を進めている<sup>44</sup>。

BMI 市場が立ち上がっていない日本では従来 ELSI の議論も小規模にとどまっていたが<sup>45</sup>、海外の研究開発の動向を考えると、日本でも遠くない将来に BMI の導入が本格化する可能性がある。日本でも研究者や企業、市民を巻き込んだ形で BMI の ELSI に関する議論の活性化を急ぐべきだろう。

<sup>36</sup> The Wall Street Journal 電子版(2023年2月15日)“When Your Boss Is Tracking Your Brain”, <https://www.wsj.com/articles/brain-wave-tracking-privacy-b1bac329>、The Wall Street Journal 電子版(2019年10月24日)“China’s Efforts to Lead the Way in AI Start in Its Classrooms”, <https://www.wsj.com/articles/chinas-efforts-to-lead-the-way-in-ai-start-in-its-classrooms-11571958181> (いずれも 2024年3月18日参照)

<sup>37</sup> 日立建機グループの豪 SmartCap Technologies が提供する疲労検知デバイスは 2023 年時点で世界 5,000 社超が導入しているという。(Nita A. Farahany (2023) “Neurotech at Work”, Harvard Business Review, March–April 2023)

<sup>38</sup> BRAIN Initiative では米国大統領生命倫理委員会で ELSI を議論して 2014 年に報告書「Gray Matters」をまとめ、NIH も 2019 年に出したレポート「Neuroethics Roadmap」で主に研究者向けの課題を指摘した。

<sup>39</sup> U.S. Food and Drug Administration (2021) “Implanted Brain-Computer Interface (BCI) Devices for Patients with Paralysis or Amputation - Non-clinical Testing and Clinical Considerations, Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff”

<sup>40</sup> 中華人民共和国科学技術部 (2023) 「脳機接口研究倫理指引」

<sup>41</sup> チリは肉体と精神の不可侵性を守る「神経権」の考え方を 2021 年の憲法改正案に盛り込んだが、国民投票で否決された。米国ではコロラドやミネソタなど複数の州で脳データを個人情報として保護する法案の議論が進んでいる。

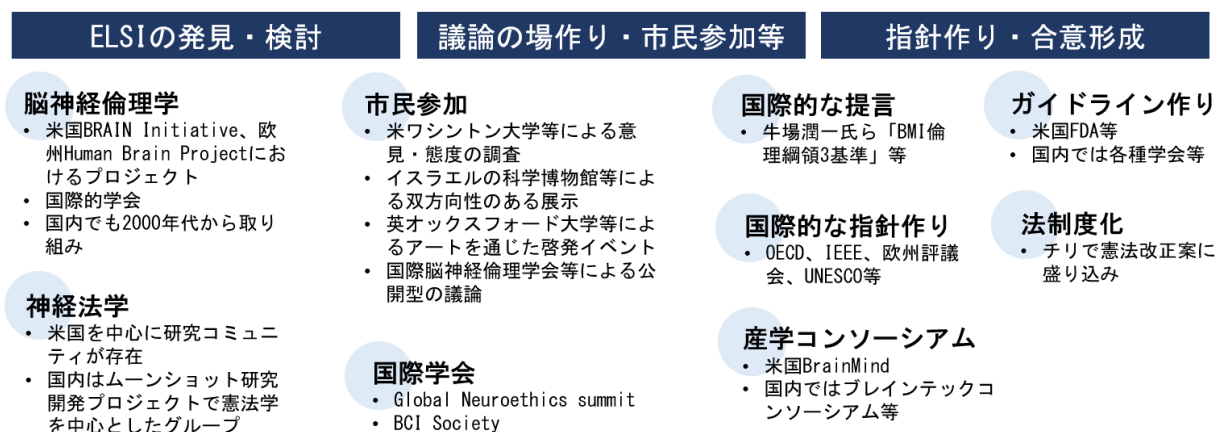
<sup>42</sup> OECD (2019) “Responsible innovation in neurotechnology enterprises”

<sup>43</sup> BMI 研究には「BMI 動作が引き起こした事故や事件に対する法的責任の明確化 (行動責任)」「読み出した脳情報の保護、脳への不正なアクセス防止 (個人情報保護)」「技術情報の正確かつ迅速な開示に基づく倫理規範の熟成と社会受容の促進 (社会啓発)」の倫理綱領 3 基準の必要性を訴える声明を『Science』誌に発表した。

<sup>44</sup> 国際電気通信基礎技術研究所・アラヤ (2021年7月30日)「BMI 利用ガイドラインの作成がスタート～誰もがブレイン・テックを正しく理解して安全に使える社会へ～」

<sup>45</sup> 科学技術振興機構研究開発戦略センター (2022) 「ニューロテクノロジーの健全な社会実装に向けた ELSI/RRR 実践」

《図表5》BMIのELSIを巡る国内外の主な議論の状況



(出典) 科学技術振興機構研究開発戦略センター (2022) 「ニューロテクノロジーの健全な社会実装に向けた ELSI/RRR 実践」を基に SOMPO インスティテュート・プラス作成

#### 4. おわりに

日本で BMI を巡る ELSI の議論を活性化するため、主体としては企業の行動に期待したい。企業には技術や製品・サービスの開発・提供者としての責任があるのは当然だが、ELSI の議論に主体的に関わることで得られる事業活動上のメリットも大きいと考えられる。一般に法規制やガイドラインは新興技術の社会影響の可能性が予見されるようになってから策定されるため、新たな市場の創出を狙う企業にとっては規制を待っていると製品やサービスの設計に出遅れてしまう。ELSI の議論が収斂していくことはすなわち技術進化の方向性が定まることを意味し、ELSI の議論に早期から携わった企業はそこで得られた知見を研究開発や販売戦略に活かすことができる。

企業にとっては自社の製品・サービスの社会的受容性を高めるためにも議論への参加は重要だ。新興技術は技術的に優れていたとしても社会の理解が得られなければ実装は難しい。例えば米 Google のグループ企業は 2017 年にカナダで 5,000 万ドル規模を投じるスマートシティ計画を発表したが、市民団体等から「企業による監視都市」になると反発を受けて頓挫した例がある<sup>46</sup>。新興技術を手掛ける企業は技術に磨きをかけると同時に、市民との密接なコミュニケーションを通じた信頼感の醸成にも力を尽くすべきだ。

ELSI 議論への参加が企業活動に与える影響が大きいということは、裏を返せば産業振興の面でも議論活性化の意義は深いと言える。海外で BMI の研究開発と市場拡大が先行している現状を踏まえると、国内で BMI 産業を育てるためにも、国や自治体が音頭を取って議論を盛り上げていくことが重要だろう。

BMI を巡る ELSI への対応は日本人の精神性や倫理観とも密接に関連するものであり、海外の議論をそのまま輸入すべきものではないと考える。米国で臨床試験が進むデバイスが薬事承認されれば、日本市場への投入を検討する企業も現れる可能性がある。技術進化が先行して受け入れ側の ELSI の議論とかけ離れてしまうと、導入時のショックは大きくなる。海外の事例を対岸の火事にとらえることなく、日本人一人ひとりが自身の問題として考えを深めていく必要がある。

本資料は、情報提供を目的に作成しています。正確な情報を掲載するよう努めていますが、情報の正確性について保証するものではありません。本資料の情報に起因して生じたいかなるトラブル、損失、損害についても、当社および情報提供者は一切の責任を負いません。

<sup>46</sup> The New York Times 電子版 (2019 年 10 月 31 日) “Toronto’s City of Tomorrow Is Scaled Back Amid Privacy Concerns”, <https://www.nytimes.com/2019/10/31/world/canada/toronto-google-sidewalk.html> (2024 年 3 月 18 日参照) 2024/03/29